



تحلیل محاسباتی نقش پروتون‌های کم انرژی در وقوع به هم ریختگی های تک حادثه‌ای بر یک حافظه SRAM با فن آوری ۶۵ نانومتری CMOS

معصومه سلیمانی‌نیا، غلامرضا رئیس‌علی*، امیر مصلحی

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۵/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۱

چکیده

در این تحقیق به تحلیل محاسباتی نوعی از اثرات پرتو بر قطعات الکترونیک تحت عنوان به هم ریختگی های تک حادثه‌ای (SEU) با استفاده از کد Geant4 پرداخته شد و نتایج، با مقادیر گزارش شده در یک کار تجربی مشابه و یک کار شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی CRÈME-MC مقایسه گردید. به هم ریختگی های تک حادثه‌ای رخ داده‌های رایجی هستند که به طور ناگهانی و با تغییر حالت منطقی قطعه (تبدیل ۰ به ۱ یا بالعکس) موجب اختلال در عملکرد آن می‌شوند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده سطح مقطع به هم ریختگی ناشی از پروتون‌های کم تر از ۱۰ MeV برای یک حافظه SRAM با فن آوری ۶۵ نانومتری CMOS به دست آمد و میزان اثربخشی ذرات و نیز سازوکار ایجاد به هم ریختگی تجزیه و تحلیل شد. نتیجه تحلیل‌ها نشان دادند، بیشترین میزان به هم ریختگی ناشی از پروتون‌های با انرژی کم تر از ۱ MeV تحت سازوکار یونش مستقیم و در نتیجه قرارگیری طیف پروتون‌هایی درون حجم حساس است که بیشترین توان ایستاندگی را دارند. همچنین نتایج محاسبات نشان دادند، در انرژی‌های بین ۲ MeV تا ۱۰ MeV پروتون فرودی، سیلیکون‌های پس زده ناشی از پراکندگی کشسان پروتون‌ها درون حجم حساس در وقوع به هم ریختگی نقش غالب دارند و سهم پروتون‌ها و سایر ذرات تولید شده در لایه‌های قبل از حجم حساس در مقایسه با سیلیکون پس زده ناچیز است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل محاسباتی، به هم ریختگی های تک حادثه‌ای، پروتون‌های کم انرژی، حافظه SRAM با فن آوری ۶۵ نانومتری CMOS، Geant4

A computational analysis on the role of low energy proton-induced single event upset in a 65 nm CMOS SRAM

M. Soleimaninia, G. Raisali*, A. Moslehi

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 1339-14155, Tehran - Iran

Research Article

Received 22.8.2019, Accepted 22.12.2019

Abstract

This investigation is a computational analysis of a kind of radiation effect on electronic devices, known as the single event upset (SEU) with the Geant4 toolkit. Accordingly, the results are compared with the similar experimental work and a simulation study which is performed by CRÈME-MC Monte Carlo simulation code. Single event upsets are the most common events which abruptly change the logic state of the device (1 to 0 or vice versa) and cause a disturbance in their performance. In the simulations, low energy protons (< 10 MeV)-induced SEU cross sections in a 65 nm CMOS SRAM were calculated and various particle effectivenesses and physical mechanisms inducing upsets were studied. The analysis of the results showed that most of the upsets occur due to incident protons with energies of less than 1 MeV under the mechanism of direct ionization. This is due to the fact that protons entering the sensitive volume have the maximum stopping power. This study also revealed that for protons with energies between 2 and 10 MeV, recoiled silicon atoms have a dominant role in SEU while other particles produced in preceding layers have a negligible effect compared to the recoiled silicon produced inside the sensitive volume.

Keywords: Computational analysis, Single event upset, Low energy protons, 65 nm CMOS SRAM, Geant4

*Email: graisali@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

پیشرفت روزافزون تکنولوژی و کوچک‌تر شدن ابعاد مدارهای مجتمع علی‌رغم مزایایی که به آن اشاره شد، افزایش حساسیت آن‌ها را در برابر پرتو در پی داشته است [۴]. مطالعات نشان داده‌اند، رخداد‌های تک‌حادثه‌ای مهم‌ترین دلیل از کار افتادن قطعات الکترونیک با فن‌آوری‌های جدید در دنیای امروز محسوب می‌شوند که خود انواع گوناگونی دارند [۴]. در این رویدادها ذرات یوننده پس از برخورد با قطعه، انرژی خود را طی مکانیزم‌های مختلفی هم‌چون یونش و یا برانگیزش اتم‌ها از دست داده و مقدار زیادی الکترون - حفره در امتداد مسیر حرکت ذره ایجاد می‌کنند. دو مفهوم کلیدی در تبیین رخداد‌های تک‌حادثه‌ای مفهوم بار بحرانی و حجم حساس است [۲]. حجم حساس قطعه، حجمی است که کلیه بارهای برجا گذاشته شده توسط ذرات اولیه و ثانویه مؤثر بر رخداد را شامل می‌شود. بار بحرانی نیز کم‌ترین مقدار بار ایجاد شده درون حجم حساس برای وقوع یک رویداد است [۲]. حساس‌ترین نواحی برای جمع‌آوری بارها، نواحی تهی (اتصالات p-n) هستند. در میدان الکتریکی بالای موجود در این ناحیه، حامل‌های بار به سمت الکترودها جمع‌آوری می‌شوند. حامل‌های بار تولید شده خارج از این ناحیه در شرایطی که به سمت ناحیه مذکور پخش شوند، در تولید جریان مشارکت می‌کنند. از این‌رو جریان گذرا عموماً یک مؤلفه سریع به سبب سوق حامل‌های تولید شده با برخورد مستقیم ذره در ناحیه حساس و یک مؤلفه کند به سبب جمع‌آوری حامل‌های تولید شده بیرون ناحیه حساس که از طریق فرایند پخش به سمت آن می‌روند، خواهد داشت [۵]. تولید پالس جریان گذرا در نتیجه اثرات تک‌حادثه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است [۵]. رایج‌ترین رخداد‌های تک‌حادثه‌ای، به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای^۶ هستند. این رویدادها زمانی به‌وقوع می‌پیوندند که بار برجا گذاشته در نتیجه برخورد ذره فرودی درون قطعه به اندازه‌ای باشد که بتواند حالت منطقی یک بیت را تغییر دهد. اهمیت این رویدادها تا آن جاست است که نقشه راه^۷ انجمن صنعت نیمه‌هادی^۸ به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای را مهم‌ترین تهدید برای عملکرد مطمئن سیستم‌های الکترونیکی به‌دلیل کاهش ابعاد قطعات در فن‌آوری‌های جدید و افزایش حساسیت در برابر پرتو در آینده دانسته است [۶].

قرارگیری قطعات الکترونیک در محیط‌های پرتویی در کاربردهای مختلف هم‌چون صنعت هوافضا، شتاب‌دهنده‌های ذرات، نیروگاه‌های هسته‌ای و مراکز پزشکی می‌تواند موجب آسیب و بروز اختلال در عملکرد آن‌ها شود [۱]. پرتوگیری این قطعات ممکن است منجر به از دست رفتن موقتی داده‌ها یا از کار افتادن دائمی آن‌ها شود [۱].

تابش‌های موجود در محیط‌های پرتویی با مواد سازنده قطعات و مدارهای الکترونیک برهم‌کنش انجام می‌دهند. سازوکارهای آسیب را می‌توان در سه دسته کلی آسیب جابه‌جایی^۱ (DD)، دز یونیزان کل^۲ (TID) و اثرات تک‌حادثه‌ای^۳ (SEE) مورد بررسی قرار داد [۲]. از دو دسته نخست تحت عنوان اثرات انباشته^۴ نیز یاد می‌شود. اثرات انباشته به آسیب یا دز جذبی ناشی از تعداد زیادی ذرات اطلاق می‌شود، در حالی‌که اثرات تک‌حادثه‌ای به تأثیر یک ذره بر عملکرد قطعه اشاره دارد [۲]. اثرات انباشته به‌تدریج پارامترهای عملیاتی قطعه نظیر ولتاژ آستانه و جریان نشتی را تغییر می‌دهند، حال آن‌که رخداد‌های تک‌حادثه‌ای موجب بروز تغییرات ناگهانی و یا رفتارهای گذرا در مدار می‌شوند [۲].

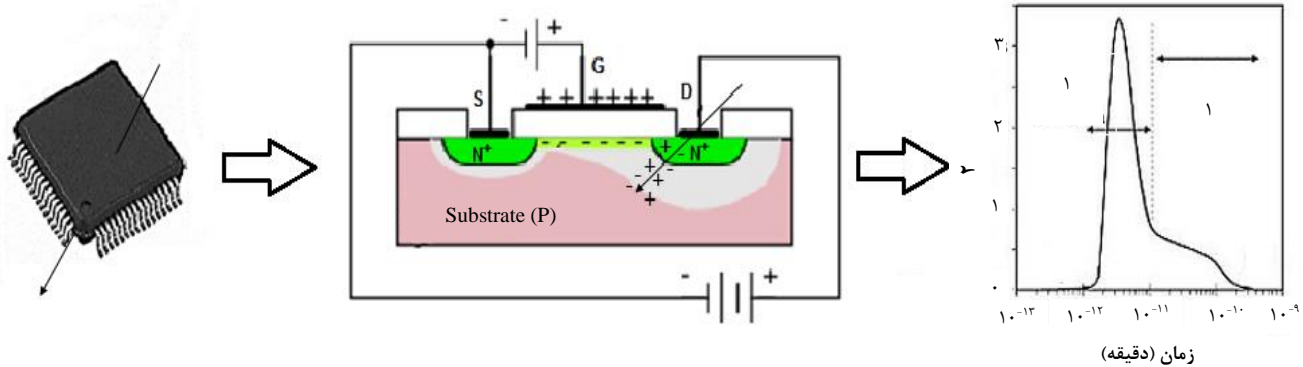
یکی از مهم‌ترین محیط‌های پرتویی فضا است، بدین جهت بررسی اثرات پرتو بر قطعات الکترونیک مورد استفاده در کاربردهای فضایی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۳]. یکی از فن‌آوری‌هایی که امروزه مورد توجه گسترده وسیعی از کاربردهای دیجیتال هم‌چون ریزپردازنده‌ها، میکروکنترلرها، حافظه‌های ایستا و ... قرار دارد، فن‌آوری CMOS^۵ است. از مهم‌ترین مزایای این فن‌آوری، امکان به‌کارگیری تراشه‌ها در ابعاد کوچک‌تر است که سبب می‌شود ویژگی‌هایی هم‌چون سرعت بالاتر و توان مصرفی کم‌تری داشته باشند [۱]. از این گذشته قطعاتی که با این فن‌آوری ساخته می‌شوند از درجه بالایی از مصونیت در برابر نوفه برخوردارند [۱]، بدین جهت این فن‌آوری گزینه مورد توجهی برای بسیاری از کاربردها از جمله صنعت هوافضا محسوب می‌شود.

1. Displacement Damage
2. Total Ionizing Dose
3. Single Event Effects
4. Cumulative Effects
5. Complementary Metal- Oxide- Semiconductor

6. Single Event Upset (SEU)

7. Road Map

8. Semiconductor Industry Association (SIA)



شکل ۱. نمایش تولید پالس جریان گذرا در نتیجه اثرات تک‌حادثه‌ای [۵].

مختلف و نیز تغییرات الگوی نوشته شده درون حافظه‌ها بر سطح مقطع SEU مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در سال ۲۰۱۸، Lou و همکارانش علاوه بر بررسی‌های مذکور پیرامون اثرات زاویه بر روی یک حافظه SRAM با فن‌آوری ۶۵ نانومتر مطالعاتی در قالب تجربه انجام دادند [۱۴]. کلیه پژوهش‌های فوق بر اهمیت پروتون‌های کم انرژی در وقوع رخداد SEU تأکید داشتند. تحقیقات بیشتر نشان دادند یون‌های پس‌زده حاصل از برخوردی کاشسان و ناکشسان میان پروتون و اتم‌های سازنده قطعات نیز ممکن است عامل دیگری در ایجاد SEU باشند. در سال ۲۰۱۷، Akkerman و همکارانش با ارایه یک تحلیل محاسباتی پیرامون سیلیکون به‌عنوان ماده اصلی سازنده حجم حساس و مقایسه آن با برخی تجربه‌های انجام شده، به اهمیت نقش سیلیکون‌های پس‌زده در نتیجه برخورد پروتون‌های کم‌انرژی به درون حجم حساس تأکید کردند [۱۵]. در سال ۲۰۱۹، Caron و همکارانش با بهره‌گیری از کد Geant4، سازوکارهای فیزیکی مختلف حاکم بر SEU در بازه وسیعی از انرژی‌های پروتون فرودی درون سیلیکون موجود در حجم حساس را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. مسئله تعیین به‌هم‌ریختگی در نتیجه پروتون‌های کم انرژی به خصوص در کاربردهای فضایی به دلیل شارش زیاد آن‌ها در فضا از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. چالش‌های چندی در بررسی تجربی سازوکارهای تأثیرگذار بر وقوع SEU توسط پروتون‌های کم‌انرژی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به برد اندک پروتون‌ها، پاشیدگی انرژی^۳ به دلیل حضور لایه‌های قرار گرفته در بالای حجم حساس^۴ (BEOL) و عدم قطعیت در توان توقف اشاره کرد [۱۷، ۱۸]. به‌طور کلی وقتی یک تراشه با پروتون‌های تک انرژی و تک جهته پرتو دهی شود آن‌چه در واقعیت به حجم حساس می‌رسد، شار کاهش یافته‌ای از

از آن‌جا که پروتون‌ها حدود ۹۰٪ پرتوهای باردار کیهانی را تشکیل می‌دهند [۷، ۸]، بررسی به‌هم‌ریختگی‌های حاصل از پروتون‌ها سهم قابل‌ملاحظه‌ای از تحقیقات را به خود اختصاص داده است [۹، ۱۰]. مطالعات انجام شده پیرامون رویدادهای تک‌حادثه‌ای در دهه‌های گذشته، یون‌های سنگین را به دلیل LET^۱ بالاتر آن‌ها نسبت به پروتون‌ها، تهدید جدی‌تری برای ایمنی ماهواره‌ها و سفینه‌های فضایی نشان داده بودند [۸]. در فن‌آوری‌های قدیمی‌تر مدارهای مجتمع، تنها پروتون‌های پرانرژی ضمن اندرکنش‌های هسته‌ای که منجر به تولید ذرات ثانویه با LET بالاتر می‌شدند علت وقوع SEU شناخته شده بودند، ولی کاهش ابعاد قطعات در فن‌آوری‌های جدید که افزایش حساسیت آن‌ها در برابر پرتو را در پی داشته موجب گردیده تا پروتون‌های کم‌انرژی نیز طی مکانیزم یونش مستقیم در برخی قطعات الکترونیک منجر به ایجاد SEU شوند [۱۰]. اولین بار در سال ۲۰۰۷، Rodbell و همکارانش پس از پرتو دهی حافظه با پروتون‌های کم انرژی، متوجه افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در میزان به‌هم‌ریختگی‌ها شدند و آن را در نتیجه سازوکار یونش مستقیم پروتون‌ها دانستند [۱۰]. پس از آن تحقیقات متعددی پیرامون پروتون‌های کم انرژی در انواع مختلف قطعات انجام گرفت. در سال ۲۰۱۱، Seifert و همکارانش در یک کار تجربی تأثیر پروتون‌های کم انرژی را بر روی دو لچ^۲ با فن‌آوری‌های ۴۵ و ۳۲ نانومتری تحقیق کردند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴، Dodd و همکارانش در تجربه‌ای دیگر تأثیر پروتون‌های کم‌انرژی را بر روی سه حافظه SRAM با فن‌آوری‌های ۶۵، ۴۵ و ۳۲ نانومتری مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۷، Ye و همکارانش تأثیر این پروتون‌ها را در قالب یک تحقیق تجربی بر روی سه مدل حافظه SRAM با فن‌آوری‌های ۶۵ نانومتر با در نظر گرفتن تأثیر بایاس‌های

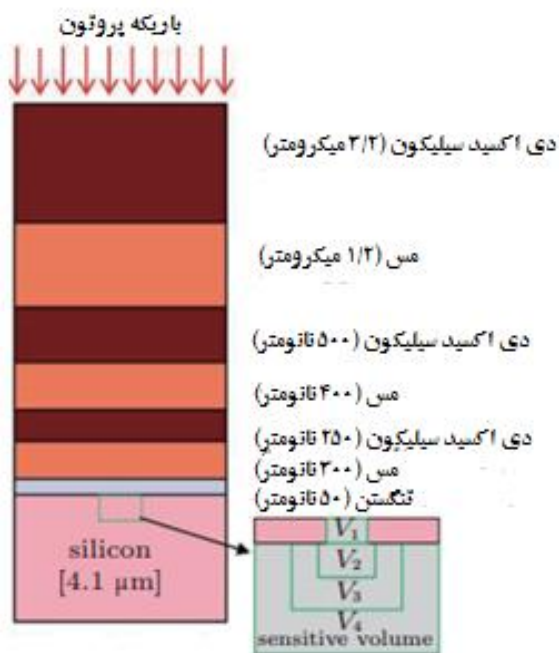
3. Energy Stragglng
4. Back End of Line (BEOL)

1. Linear Energy Transfer
2. Latch

محاسبات و شبیه‌سازی میزان به هم‌ریختگی‌های ایجاد شده در یک نمونه حافظه SRAM با فن‌آوری ۶۵ نانومتری ساخت شرکت CYPRESS از منظری متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نکته‌ای که این پژوهش را از سایر مطالعات این حوزه متمایز می‌سازد، تحلیل جامعی از اندرکنش‌های پروتون درون لایه‌های BEOL به منظور تعیین منشأ به هم‌ریختگی‌ها است و اهمیت آن در برشمردن نقش لایه‌هایی است که می‌توانند در بروز به هم‌ریختگی‌ها تأثیرگذار باشند. هم‌چنین در این پژوهش در تفسیر نتایج کیفی که سایر محققین در مطالعات خود در توجیه بیش‌ترین میزان به هم‌ریختگی‌ها به آن‌ها اشاراتی داشته‌اند، تحلیل‌های کمی و دلایل محکم ارایه شده است.

۲. روش کار

مدل شبیه‌سازی شده برای یک سلول حافظه با توجه به مرجع [۲۰] از بخش‌های زیرلایه به ابعاد $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ و حجم حساس به ابعاد $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ از جنس سیلیکون و لایه‌های BEOL در بالای حجم حساس که برقراری اتصالات درونی مدار را بر عهده دارند، مطابق با شکل ۲ انتخاب شد [۲۰]. لایه‌های BEOL شامل دی‌اکسید سیلیکون، مس و تنگستن با ضخامت‌های نشان داده شده در شکل ۲ هستند.

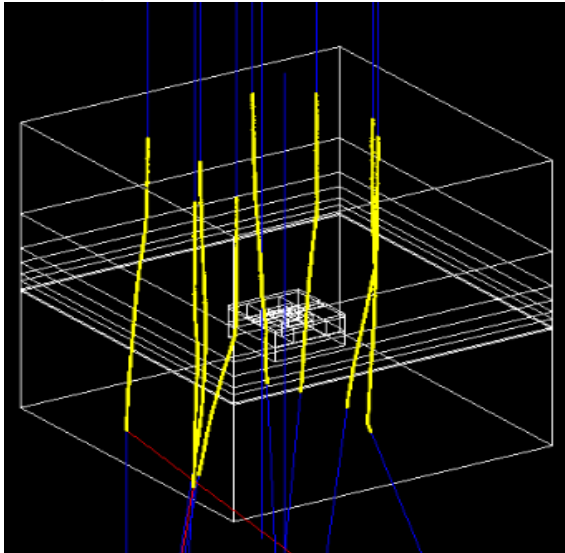


شکل ۲. ساختار کلی یک حافظه SRAM با فن‌آوری ۶۵ نانومتری CYPRESS [۲۰].

پروتون‌ها با انرژی‌ها و زوایای مختلف است. نتایج به دست آمده از تحقیقات تجربی در زمینه پروتون‌های کم انرژی نشان داده‌اند که قله منحنی سطح مقطع SEU در محدوده باریکی از انرژی پروتون اتفاق می‌افتد که تغییر اندکی در آن ممکن است افزایش یا کاهش قابل ملاحظه‌ای از به هم‌ریختگی‌ها را در پی داشته باشد [۱۴]. از این رو به منظور دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر در تحقیقات تجربی، ضروری است باریکه پروتون تا حد امکان تک انرژی باشد. در بسیاری از پژوهش‌ها از باریکه‌های پروتون پراکنشی و قرار دادن کاهنده‌هایی در مقابل باریکه برای رسانیدن پروتون به سطح انرژی مطلوب استفاده می‌شود که خود عامل ایجاد پاشیدگی انرژی هستند. به منظور کاهش پاشیدگی راه‌کارهای گوناگونی هم‌چون اجتناب از قرار دادن مواد کاهنده انرژی در مسیر باریکه پروتون فرودی، انجام آزمایش‌ها در خلأ و حذف بخش عمده‌ای از مواد مورد استفاده در ساختار تراشه‌ها (BEOL و زیرلایه^۱) اتخاذ می‌شود [۱۱]. با این تمهیدات پاشیدگی انرژی تا اندازه‌ای کاهش می‌یابد ولی به‌طور کامل حذف نمی‌شود، زیرا حذف کلیه مواد سازنده به دلیل تأثیر منفی بر عملکرد قطعه امکان‌پذیر نیست [۱۱]. با توجه به توضیحات فوق، به دلیل پیچیدگی و صرف هزینه‌های بالا برای انجام آزمایش‌ها، لازم‌ه تحلیل فیزیکی دقیق به منظور درک اندرکنش‌ها میان پروتون و ماده و نیز سازوکارهایی که قطعات الکترونیک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، استفاده از رهیافت مونت‌کارلو و شبیه‌سازی است.

یکی از پرکاربردترین و در عین حال آسیب‌پذیرترین قطعات در برابر پروتون حافظه‌ها هستند که بر مبنای چگونگی ذخیره‌سازی و دسترسی به اطلاعات، انواع مختلف دارند. متداول‌ترین آن‌ها حافظه‌های دسترسی تصادفی ایستا^۲ (SRAM) است که اطلاعات ذخیره شده درون خود را تا زمانی که تغذیه به آن اعمال شده باشد، حفظ کرده و از آن به دلیل سرعت بالا در انواع مختلف پردازنده‌ها استفاده می‌شود و عملکرد صحیح آن‌ها در مدارهای الکترونیک از اهمیت بالایی برخوردار است. حافظه‌های پرکاربرد SRAM مساحت زیادی از سطح تراشه را در پردازنده‌های کنونی اشغال کرده و بار بحرانی آن‌ها در فن‌آوری‌های نانومتری CMOS نسبتاً اندک است [۱۹]. از این رو گزینه مناسبی جهت تحقیق پیرامون SEU های تولید شده از پروتون محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش در تکمیل بررسی‌هایی که سایر محققان در زمینه پروتون‌های کم انرژی داشته‌اند، به کمک

1. Substrate
2. Static Random Access Memory (SRAM)



شکل ۳. مدل شبیه‌سازی شده ساختار شکل ۲ در کد Geant4 [۲۱].

در گام نخست، اندرکنش پروتون‌های کم‌انرژی با مواد BEOL و حجم حساس حافظه SRAM به منظور تعیین میزان اثربخشی آن‌ها در وقوع به‌هم‌ریختگی به کمک ابزار شبیه‌ساز Geant4 با مدل فیزیکی Option4 G4Em Standard Physics با انرژی قطع^۲ صفر مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه‌ی آن الکترون‌های با انرژی بیشتر از ۱۰۰ eV و کلیه پروتون‌ها (انرژی قطع صفر) در محاسبات لحاظ می‌شوند. محدوده انرژی پروتون‌های مورد مطالعه در این پژوهش از ۶۰۰ keV تا ۱۰ MeV در نظر گرفته شد. حد پایین انرژی با توجه به جنس و ضخامت لایه‌های BEOL به گونه‌ای انتخاب شد که پروتون‌ها بتوانند پس از عبور از لایه‌های مذکور و رسیدن به حجم حساس، در ایجاد به‌هم‌ریختگی مشارکت کنند. با توجه به مطالعات انجام شده در این حوزه منظور از پروتون‌های کم‌انرژی، اغلب پروتون‌های کم‌تر از ۱۰ MeV است.

به‌منظور تعیین سطح مقطع به‌هم‌ریختگی حاصل از پروتون‌های کم‌انرژی، انرژی منتقل شده از کلیه ذرات رسیده به حجم حساس در هر رویداد^۳ محاسبه شد و بار ایجاد شده از روابط (۱) و (۲) به دست آمد.

$$(1) \quad \text{تعداد جفت الکترون - حفره تولید شده} = \frac{\text{انرژی سپارش شده}}{۳۶ \text{ eV}}$$

در مطالعات شبیه‌سازی به منظور ملاحظه اثرات جمع‌آوری ناقص بار در نتیجه فرایندهای بازترکیب و یا پخش به طور معمول از روش حجم حساس وزن داده شده^۱ استفاده می‌شود که در آن حجم حساس به چندین ناحیه متمایز تقسیم شده و به هر یک ضریبی تحت عنوان ضریب جمع‌آوری بار نسبت داده می‌شود. در این روش در درونی‌ترین ناحیه، بیش‌ترین میزان بار تولید شده و در سایر نواحی به دلیل فرایندهای بازترکیب و پخش بارهای کم‌تری جمع‌آوری می‌شوند [۶]. با به کارگیری این روش نتایج به دست آمده انطباق بهتری با تجربه پیدا می‌کنند. در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی محاسبات انجام شده با نتایج ارایه شده در مرجع [۲۰] مطابق با شکل ۲ برای حجم حساس ۴ ناحیه V_1 تا V_4 با ابعاد $0.1 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m}$ ، $0.2 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ و $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد. ضرایب جمع‌آوری بار با توجه به مراجع [۲۰] و [۶] انتخاب شد. به منظور انطباق بهتر یافته‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [۲۰] این ضرایب به گونه‌ای تعیین شدند که مطابقت خوبی در بازه وسیعی از انرژی حاصل شود.

بار بحرانی قطعه با توجه به مرجع [۲۰] برابر با ۱۳۵ fC در نظر گرفته شد. چنان‌چه شرح داده شد، به‌هم‌ریختگی زمانی اتفاق می‌افتد که بار ایجاد شده درون حجم حساس بیش از بار بحرانی باشد. میدان پرتویی به‌صورت یک چشمه سطحی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که کل مساحت قطعه را دربرگیرد. انرژی اولیه پروتون‌ها مطابق با شکل ۲، انرژی رسیده به سطح تراشه لحاظ گردید. با این فرضیات، ساختار نشان داده شده در شکل ۲ در بسته شبیه‌سازی Geant4 مطابق با شکل ۳ شبیه‌سازی شد [۲۱]. در این شکل خطوط آبی رنگ مربوط به پروتون‌های فرودی، خطوط قرمز نشان‌دهنده یون‌های سیلیکون پس‌زده و خطوط زرد رنگ مربوط به الکترون‌های ثانویه پرنرژی موسوم به δ -ray هستند. لازم به توضیح است که این شکل به ازای اجرای برنامه با ۱۰ پروتون گسیلی از چشمه به دست آمده و در صورتی که برنامه برای تعداد زیادی پروتون فرودی اجرا شود ممکن است ذراتی هم‌چون اکسیژن و آلفا که احتمال تولید آن‌ها در نتیجه اندرکنش پروتون‌های مورد بررسی اندک است نیز مشاهده شوند.

2. Energy Cutoff
3. Event

1. Weighted Sensitive Volume

انرژی‌های پروتون فرودی بین ۲ MeV تا ۵ MeV، ذرات تولید شده مذکور همگی در لایه‌های BEOL متوقف شده و به حجم حساس نمی‌رسند. از این رو درصد زیادی از بهم‌ریختگی‌های ایجاد شده در این انرژی‌ها در نتیجه پراکندگی کشسان اتم‌های سیلیکونی است که درون حجم حساس وجود دارند. به ازای پروتون‌های فرودی بیش از ۵ MeV، انرژی انتقال یافته به ذراتی هم‌چون اکسیژن و آلfa به اندازه‌ای است که انرژی لازم برای رسیدن به حجم حساس را به دست آورده و می‌توانند سبب بروز بهم‌ریختگی شوند. می‌توان گفت با افزایش انرژی پروتون فرودی احتمال تولید ایزوتوپ‌های متنوع‌تری از ذرات با گستره انرژی وسیع‌تر وجود دارد که سبب می‌شود ذرات تولید شده در یک لایه در لایه‌های بعدی هم حضور داشته باشند.

نتایج به دست آمده از محاسبات بهم‌ریختگی در این پژوهش با کار تجربی انجام شده بر روی حافظه SRAM فن‌آوری CMOS با استفاده از شتاب‌دهنده تاندم EN-18 در دانشگاه پکن [۲۰] و نیز کار شبیه‌سازی با کد CRÈME-MC [۲۰] مقایسه شد. کد CRÈME-MC برای شبیه‌سازی اختصاصی اثرات تک‌حادثه‌ای بر روی قطعات الکترونیک و بر مبنای روش‌های آماری توسعه داده شده است [۲۲]. چنانچه از نمودار شکل ۴ برمی‌آید، تطابق قابل قبولی میان نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این کار با کار تجربی و شبیه‌سازی انجام شده در مرجع [۲۰] دیده می‌شود. با توجه به منحنی شکل ۴، در ناحیه انرژی‌های کم‌تر از ۱ MeV، مطابقت کم‌تری بین پاسخ‌های به دست آمده از تجربه و شبیه‌سازی وجود دارد. این اختلاف را می‌توان به امکان تنظیم دقیق‌تر باریکه در انرژی‌های بیش از ۱ MeV نسبت به انرژی‌های پایین‌تر در تجربه نسبت داد. زیرا انرژی‌های کم‌تر از ۱ MeV با استفاده از تضعیف‌کننده تأمین شده‌اند که دارای افت‌وخیز انرژی خواهند بود. با توجه به مطالعات انجام شده [۱۴]، محدوده انرژی پروتون که به ازای آن بیش‌ترین میزان بهم‌ریختگی‌ها روی می‌دهد، بسیار باریک است. این محدوده برای SRAM فن‌آوری مورد بحث در این مقاله حدود ۲۰۰ keV می‌باشد [۱۴]. از این رو چنانچه در عمل در تنظیم باریکه فرودی دقت لازم وجود نداشته باشد، می‌تواند منجر به اختلاف پاسخ‌های به دست آمده در تجربه و شبیه‌سازی شود. این مسئله بر دشواری‌های برشمرده شده در انجام آزمایش با پروتون‌های کم‌انرژی که در بخش‌های پیشین به آن اشاراتی شد، صحه می‌گذارد.

در رابطه (۱)، انرژی متوسط لازم برای تولید یک جفت الکترون - حفره درون سیلیکون ۳/۶ eV است.

(۲) بار تولید شده = تعداد جفت الکترون - حفره تولید شده × بار پایه

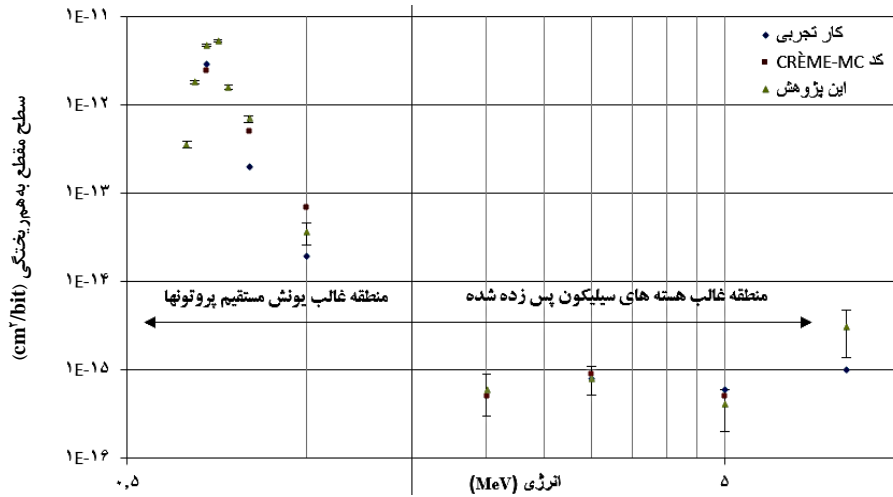
در رابطه (۲) بار پایه، $10^{-19} \times 1.602 \times 10^{-19}$ کولن است. نتایج به ازای چندین انرژی فرودی پروتون در شکل ۴ نشان داده شده است. برای تعیین سطح مقطع SEU، از رابطه (۳) استفاده شده است.

$$\sigma = \frac{N}{\Phi} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، σ سطح مقطع بهم‌ریختگی، N تعداد بهم‌ریختگی‌ها و Φ شارش ذرات گسیل شده از چشمه را نشان می‌دهد. شارش پروتون‌های فرودی به منظور برآورد قابل قبولی از میزان بهم‌ریختگی‌ها به ازای انرژی‌های مختلف پروتون در گستره مرتبه‌های 10^{13} تا 10^{15} cm^{-2} در نظر گرفته شد.

۳. یافته‌ها و بحث

نتایج محاسبات و شبیه‌سازی‌ها برای پروتون‌های کم‌تر از ۱ MeV، تنها تولید الکترون و پروتون را در لایه‌های BEOL نشان دادند. به ازای انرژی‌های بالاتر پروتون، ذرات پس‌زده اکسیژن و سیلیکون در لایه‌ها مشاهده شدند. به‌عنوان مثال برای پروتون فرودی با انرژی‌های بیش از ۲ MeV در نخستین لایه (SiO_2)، علاوه بر الکترون و پروتون، ایزوتوپ‌های مختلفی از سیلیکون و اکسیژن دیده شد که حاصل اندرکنش کشسان پروتون‌های فرودی با اکسیژن و سیلیکون است. در لایه دوم (Cu)، ایزوتوپ‌های مختلف مس و روی در نتیجه فرایندهای پراکندگی کشسان و گیراندازی پروتون فرودی درون مس به وجود آمدند، ضمن آن‌که تعدادی اکسیژن و سیلیکون خود را از لایه قبلی به این لایه رسانیدند. در لایه سوم (SiO_2)، علاوه بر اکسیژن و سیلیکون، ذرات آلfa نیز مشاهده شد. از آن‌جا که سطح مقطع تولید آلfa در نتیجه اندرکنش‌های سیلیکون اندک است، آلfa دیده شده حاصل اندرکنش پروتون با اکسیژن می‌باشد. این ذرات در لایه بعدی هم مشاهده شدند. در آخرین لایه قبل از حجم حساس (W)، ایزوتوپ‌های مختلفی از تنگستن و نیز آلfa مشاهده شد. آلfaهای تولید شده را می‌توان ناشی از دو پدیده در نظر گرفت: (۱) اندرکنش پروتون با تنگستن، (۲) انتقال ذرات آلfa از لایه‌های بالاتر. به ازای

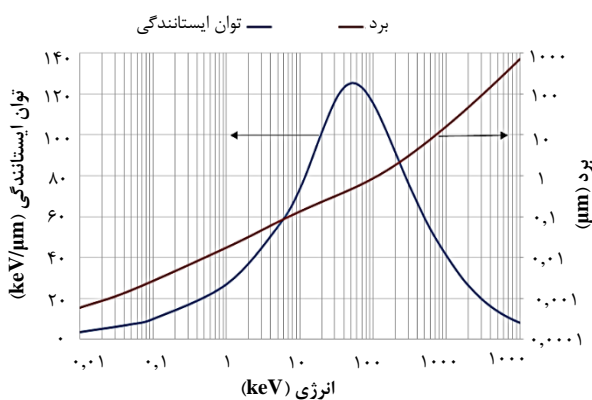


شکل ۴. مقایسه سطح مقطع به هم ریختگی برای پروتون با انرژی های فرودی گوناگون به دست آمده از شبیه سازی با کد Geant4. CRÈME-MC [۲۰] و کار تجربی [۲۰] بر روی یک حافظه SRAM با فن آوری ۶۵ نانومتری CMOS.

در شکل ۴، در محاسبات مربوط به سطح مقطع SEU برای پروتون های فرودی با انرژی کمتر از حدوداً ۱ MeV که بیشترین میزان به هم ریختگی ها به ازای آن ها روی داده خطا کم تر از ۵٪ است. در انرژی های بالاتر با توجه به نتایج به دست آمده به هم ریختگی به نحو چشمگیری کاهش می یابد. به طوری که به ازای شارش فرودی از مرتبه 10^{15} cm^{-2} ، کم تر از ۱۰ به هم ریختگی درون حجم حساس رخ داده که بدیهی است خطا در این موارد بالا است و انحراف معیار از مرتبه $\sqrt{10}$ خواهد بود. با توجه به شکل ۴، در انرژی های پروتون کم تر از ۱ MeV افزایش چشمگیری در سطح مقطع SEU نسبت به انرژی های بالاتر پروتون مشاهده می شود که میزان نقش ذرات تولید شده در وقوع به هم ریختگی را در نتیجه اندرکنش های مختلف پروتون نشان می دهد. بررسی نتایج محاسبات انجام شده برای پروتون های فرودی کم تر از ۱ MeV مشخص نمود تنها اندرکنش مؤثر، یونش مستقیم پروتون هاست. حال آن که وجود ذرات آلفا و هسته های پس زده اکسیژن و سیلیکون در انرژی های بالاتر نشان دهنده سازوکارهای دیگری همچون گیراندازی و پراکندگی کشسان پروتون با مواد سازنده قطعه است. میزان بار تولید شده توسط ذرات و هسته های مذکور در رخدادهایی که منجر به بروز به هم ریختگی شده اند، در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، سطح مقطع به هم ریختگی به ازای پروتون های کم تر از ۱ MeV حدود ده هزار برابر بیش تر از پروتون های با انرژی بالای ۲ MeV است. دلیل این اختلاف فاحش، کاهش توان ایستاندگی پروتون ها با افزایش انرژی آن ها در محدوده وسیعی از انرژی است. بر اساس نتایج محاسبات انجام شده با کد SRIM [۲۳] که در شکل ۵ نشان داده شده است، بیشترین میزان توان ایستاندگی پروتون ها درون سیلیکون برابر با $125 \text{ keV}/\mu\text{m}$ در انرژی ۵۵ keV می باشد. از این رو پروتون های فرودی با انرژی کم تر از

جدول ۱. میزان بار تولید شده توسط هسته های پس زده اکسیژن، سیلیکون و نیز ذرات آلفا در انرژی های مختلف پروتون فرودی که منجر به بروز به هم ریختگی شده اند

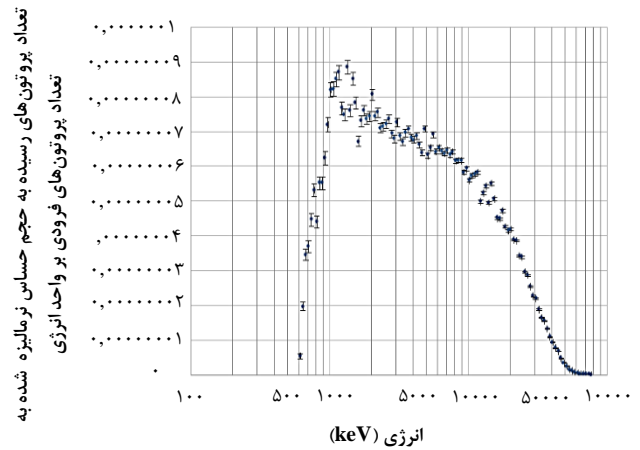
انرژی پروتون فرودی	بار ایجاد شده در نتیجه هسته های پس زده سیلیکون	بار ایجاد شده در نتیجه هسته های پس زده اکسیژن	بار ایجاد شده در نتیجه ذرات آلفا
۲ MeV	۱,۹۸ fC	-	-
۵ MeV	۵,۹۲ fC	-	-
۶ MeV	۹,۳۸ fC	-	-
۷ MeV	۷,۷۶ fC	-	-
۸ MeV	۳,۲۲ fC	۴,۶ fC	۱,۴۴ fC
۹ MeV	۱۶,۹۵ fC	-	۳,۱۹ fC
۱۰ MeV	۱۸,۳۴ fC	۶,۹۱ fC	-



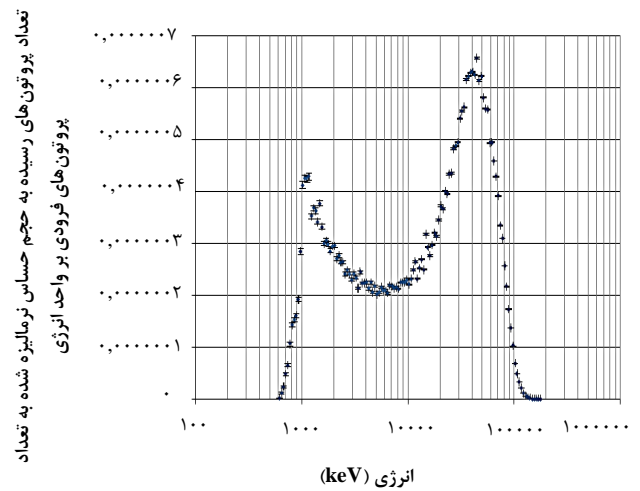
شکل ۵. نمودار برد و توان ایستاندگی پروتون درون سیلیکون برگرفته از کد SRIM [۲۳].

در شکل ۴، در محاسبات مربوط به سطح مقطع SEU برای پروتون های فرودی با انرژی کمتر از حدوداً ۱ MeV که بیشترین میزان به هم ریختگی ها به ازای آن ها روی داده خطا کم تر از ۵٪ است. در انرژی های بالاتر با توجه به نتایج به دست آمده به هم ریختگی به نحو چشمگیری کاهش می یابد. به طوری که به ازای شارش فرودی از مرتبه 10^{15} cm^{-2} ، کم تر از ۱۰ به هم ریختگی درون حجم حساس رخ داده که بدیهی است خطا در این موارد بالا است و انحراف معیار از مرتبه $\sqrt{10}$ خواهد بود. با توجه به شکل ۴، در انرژی های پروتون کم تر از ۱ MeV افزایش چشمگیری در سطح مقطع SEU نسبت به انرژی های بالاتر پروتون مشاهده می شود که میزان نقش ذرات تولید شده در وقوع به هم ریختگی را در نتیجه اندرکنش های مختلف پروتون نشان می دهد. بررسی نتایج محاسبات انجام شده برای پروتون های فرودی کم تر از ۱ MeV مشخص نمود تنها اندرکنش مؤثر، یونش مستقیم پروتون هاست. حال آن که وجود ذرات آلفا و هسته های پس زده اکسیژن و سیلیکون در انرژی های بالاتر نشان دهنده سازوکارهای دیگری همچون گیراندازی و پراکندگی کشسان پروتون با مواد سازنده قطعه است. میزان بار تولید شده توسط ذرات و هسته های مذکور در رخدادهایی که منجر به بروز به هم ریختگی شده اند، در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، سطح مقطع به هم ریختگی به ازای پروتون های کم تر از ۱ MeV حدود ده هزار برابر بیش تر از پروتون های با انرژی بالای ۲ MeV است. دلیل این اختلاف فاحش، کاهش توان ایستاندگی پروتون ها با افزایش انرژی آن ها در محدوده وسیعی از انرژی است. بر اساس نتایج محاسبات انجام شده با کد SRIM [۲۳] که در شکل ۵ نشان داده شده است، بیشترین میزان توان ایستاندگی پروتون ها درون سیلیکون برابر با $125 \text{ keV}/\mu\text{m}$ در انرژی ۵۵ keV می باشد. از این رو پروتون های فرودی با انرژی کم تر از

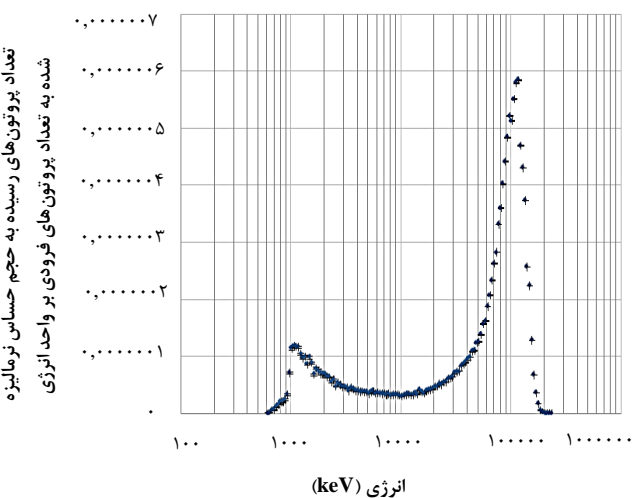
شکل‌های ۶ تا ۸ طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس به ازای انرژی‌هایی از پروتون فرودی را نشان می‌دهد که مطابق با نمودار شکل ۴ بیش‌ترین میزان به‌هم‌ریختگی در آن‌ها روی داده است. در محاسبه طیف‌های مذکور چنان‌چه اشاره شد، از ابزار شبیه‌ساز Geant4 بهره گرفته شده است که تعداد پروتون‌های رسیده به حجم حساس را بر حسب انرژی جنبشی آن‌ها نشان می‌دهد. برای این منظور الگوریتمی نوشته شد که در نتیجه آن در ابتدا با توجه به انرژی پروتون‌های فرودی، بازه‌بندی مناسبی برای انرژی انجام گرفت. شمارش پروتون‌ها بر اساس تعداد و انرژی جنبشی پروتون‌های رسیده به حجم حساس به گونه‌ای انجام شد که با هر بار ثبت، یک واحد به شمارش قبلی در بازه انرژی مربوطه افزوده گردید. در رسم طیف‌های مذکور به دلیل نابرابر بودن بازه‌های انرژی در نظر گرفته شده، در نهایت تعداد شمارش‌های ثبت شده در هر بازه به پهنای آن تقسیم و هم‌چنین به تعداد پروتون‌های فرودی نرمالیزه شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸، تفاوت‌هایی در طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس وجود دارد که در ادامه به‌طور مختصر به دلیل این تفاوت‌ها پرداخته می‌شود. چنان‌چه دیده می‌شود، به ازای پروتون‌های فرودی 710 keV و 740 keV ، دو قله در منحنی‌ها دیده می‌شود که دلیل آن پروتون‌هایی است که به هنگام رسیدن به مجاورت حجم حساس، در آستانه توقف قرار دارند. در این حالت رفتار آماری اندرکنش پروتون‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای پیدا می‌کنند، به‌طوری‌که برخی از آن‌ها که در سابقه آماری خود انرژی‌های بیش‌تری از دست داده‌اند، به حجم حساس نرسیده و برخی نیز با انرژی کم‌تر از حد متوسط پیش‌بینی شده (با استفاده از کمیت غیرآماری توان توقف) وارد حجم حساس شده و افزایش آمار پروتون‌های کم‌انرژی را در پی دارند. بدیهی است که پروتون‌های مجاور حجم حساس با انرژی‌های خیلی کم‌تر نمی‌توانند وارد حجم حساس شوند و از این‌رو آمار پروتون‌های با انرژی‌های خیلی کم کاهش قابل توجهی از خود نشان می‌دهد که موجب مشاهده قله دوم کم‌انرژی در طیف می‌گردد. به ازای پروتون‌های فرودی با انرژی 650 keV ، تقریباً کلیه پروتون‌های وارد شده به حجم حساس که در انتهای مسیر خود قرار دارند، دارای رفتار کاملاً تصادفی هستند. این وضعیت منجر به حالتی می‌شود که قله انرژی‌های بالا تقریباً حذف شده و در طیف پروتون‌های موجود درون حجم حساس، تنها قله کم‌انرژی با یک گستره وسیع‌تر مشاهده خواهد شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس برای پروتون‌های فرودی 650 keV .



شکل ۷. طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس برای پروتون‌های فرودی 710 keV .



شکل ۸. طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس برای پروتون‌های فرودی 740 keV .

با توجه به طیف‌های نشان داده شده در شکل‌های ۶ تا ۸، مشاهده می‌شود که انرژی پروتون‌های رسیده به حجم حساس عمدتاً در گستره ۵۰۰ eV تا ۳۰۰ keV است. توان ایستاندگی پروتون‌ها در این بازه از انرژی در محدوده ۲۰ keV/μm تا ۱۲۵ keV/μm و برد آن‌ها کم‌تر از ۳ μm است. با توجه به ضخامت حجم حساس انتظار می‌رود برخی از پروتون‌ها، بخشی از انرژی خود را بیرون حجم حساس برجا گذارند. در نتیجه بیش‌ترین میزان به‌هم‌ریختگی مربوط به پروتون‌هایی است که بیش‌ترین توان ایستاندگی را داشته و بتوانند همه انرژی خود را درون حجم حساس برجا گذارند. این ویژگی در طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس به ازای پروتون فرودی ۷۱۰ keV دیده می‌شود و همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان به‌هم‌ریختگی‌های روی داده مربوط به این انرژی است. مطابق با توضیحات فوق، تفسیر طیف پروتون‌های رسیده به حجم حساس به ارایه دلایل لازم برای تعیین ارتباط میان بیش‌ترین میزان به‌هم‌ریختگی‌ها با قرارگیری قله براگ درون حجم حساس که محققان در مطالعات خود گزارش کرده بودند [۱۰، ۱۲-۱۴] کمک کرده است. پیش از این، محاسبات انجام شده توسط Lou و همکارانش در مرجع [۱۴] با استفاده از برنامه محاسباتی SRIM، تنها مرجعی بود که در آن به‌طور تخمینی به محدوده‌ای از انرژی پروتون‌هایی که بیش‌ترین میزان به‌هم‌ریختگی به ازای آن‌ها روی داده، اشاره شده بود.

با افزایش انرژی پروتون‌ها توان ایستاندگی آن‌ها کاهش یافته و سازوکارهایی هم‌چون پراکندگی و گیراندازی در وقوع به‌هم‌ریختگی غالب می‌شوند. نتایج به دست آمده از محاسبات و شبیه‌سازی برای پروتون‌های فرودی در محدوده ۲ MeV تا ۵ MeV سیلیکون‌های پس‌زده درون حجم حساس را که در محدوده انرژی ۴۰ keV تا ۲۵۰ keV با توان ایستاندگی ۵۷۰ keV/μm تا ۶۵۰ keV/μm مشاهده شدند، عامل وقوع به‌هم‌ریختگی نشان دادند. به ازای انرژی‌های بیش از ۵ MeV پروتون فرودی آن‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، تعداد معدودی ذره آلفا و اکسیژن که ضمن اندرکنش پروتون با لایه‌های BEOL تولید شده‌اند، انرژی کافی برای رسیدن به حجم حساس را به دست می‌آورند. نتایج شبیه‌سازی‌ها انرژی اکسیژن رسیده به حجم حساس را در محدوده ۱۲۰ keV تا ۹۰۰ keV نشان داد که توان ایستاندگی آن‌ها در محدوده بین ۳۹۷ keV/μm تا ۱۰۲۳ keV/μm است. ذرات آلفا نیز با انرژی ۱/۳ MeV تا ۱/۵ MeV و توان ایستاندگی

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نمودار سطح مقطع به‌هم‌ریختگی برای یک حافظه SRAM با فن‌آوری ۶۵ نانومتری CMOS برای پروتون‌های کم انرژی (کم‌تر از ۱۰ MeV) به دست آورده شد و نتایج با یک کار تجربی و نیز شبیه‌سازی انجام شده با کد CREME-MC مقایسه و تطابق قابل قبولی میان آن‌ها دیده شد. یافته‌ها حاکی از آن است که بیش‌ترین مقدار سطح مقطع برای پروتون‌های فرودی ۷۱۰ keV و با میزان توان ایستاندگی بیشینه برای پروتون‌های وارد شده به حجم حساس می‌باشد.

جهت مطالعه سازوکارهای مؤثر در ایجاد به‌هم‌ریختگی، شبیه‌سازی ترابرد ذرات تولید شده در نتیجه اندرکنش پروتون با لایه‌های مختلف BEOL به منظور تعیین میزان اثربخش بودن آن‌ها انجام گردید. نتایج محاسبات و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد Geant4، حضور ذراتی هم‌چون اکسیژن، سیلیکون و آلفا را که در نتیجه اندرکنش‌های پروتون‌های فرودی (بیش از ۲ MeV) با لایه‌های مس، دی‌اکسید سیلیکون و تنگستن به حجم حساس رسیده‌اند، نشان داد. هم‌چنین این نتیجه به دست آمد که در انرژی‌های پایین‌تر پروتون فرودی (کم‌تر از ۱ MeV) تنها انرژی برجا گذاشته شده توسط پروتون‌ها از طریق سازوکار یونش مستقیم در ایجاد به‌هم‌ریختگی‌ها نقش دارد، حال آن‌که با افزایش انرژی پروتون‌ها و کاهش توان ایستاندگی آن‌ها سازوکارهای گیراندازی و پراکندگی کشسان به دلیل تولید ذراتی هم‌چون سیلیکون، اکسیژن و آلفا که توان ایستاندگی بالاتری نسبت به پروتون فرودی دارند، در وقوع به‌هم‌ریختگی غالب می‌شوند که در این میان سهم آلفا و اکسیژن که از لایه‌های BEOL به حجم حساس رسیده‌اند، نسبت به پروتون پس‌زده درون حجم حساس ناچیز است. در هر حال، اختلاف حدود ده هزار برابری میزان به‌هم‌ریختگی‌ها در پروتون‌های کم‌تر از ۱ MeV نسبت به انرژی‌های بالاتر، نشان‌دهنده سهم غالب پروتون‌ها و نقش انکارناپذیر آن‌ها در وقوع به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای است.

مراجع

1. K.P. Rodbell, et al, *Low energy proton SEUs in 32-nm SOI SRAMs at low Vdd*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **64**(3), 999-1005 (2017).
2. Petersen, Edward. *Single event effects in aerospace*. John Wiley & Sons (2011).
3. H. Beigzadeh Jalali, G. Raisali, A. Babazadeh, *Dose and Shielding Calculation of Spacecraft in Cosmic Radiation, A novel approach*, Qom University, Iran, *MS Thesis* (2008) (In Persian).
4. W. Yukinobu, *Nuclear data relevant to single event upsets in semiconductor memories induced by cosmic-ray neutrons and protons*, In *Proc. Symp. Nuclear Data, SND (2006) -III*. **03**, 1-7 (2006).
5. R.C. Baumann, *Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies*, *IEEE Transactions on Device and materials reliability*, **5**(3), 305-316 (2005).
6. B.D. Sierawski, et al, *Impact of low-energy proton induced upsets on test methods and rate predictions*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **56**(6), 3085-3092 (2009).
7. J.L. Barth, C.S. Dyer, E.G. Stassinopoulos, *Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments*. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 466-82 (2003).
8. J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, P.E. Dodd, *Radiation hardness assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: Radiation environments, physical mechanisms, and foundations for hardness assurance*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **60**(3), 2074-2100 (2013).
9. P.E. Dodd, L.W. Massengill, *Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics*, *IEEE Transactions on nuclear Science*, **50**(3), 583-602 (2003).
10. K.P. Rodbell, et al, *Low-energy proton-induced single-event-upsets in 65 nm node, silicon-on-insulator, latches and memory cells*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **54**(6), 2474-2479 (2007).
11. N. Seifert, et al, *The susceptibility of 45 and 32 nm bulk CMOS latches to low-energy protons*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **58**(6), 2711-2718 (2011).
12. N.A. Dodds, et al, *Hardness assurance for proton direct ionization-induced SEEs using a high-energy proton beam*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **61**(6), 2904-2914 (2014).
13. B. Ye, et al, *Low energy proton induced single event upset in 65 nm DDR and QDR commercial SRAMs*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Sep 1; 406:443-8 (2017).
14. L. Yin-Yong, et al, *Dependence of single event upsets sensitivity of low energy proton on test factors in 65 nm SRAM*, *Chinese Physics B*, **27**(7), 078501 (2018).
15. A. Avraham, J. Barak, N.M. Yitzhak, *Role of elastic scattering of protons, muons, and electrons in inducing single-event upsets*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **64**(10), 2648-2660 (2017).
16. P.C. Caron, et al, *Physical mechanisms of proton-induced Single-Event Upset in integrated memory devices*, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (2019).
17. N.A. Dodds, et al, *The contribution of low-energy protons to the total on-orbit SEU rate*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **62**(6), 2440-2451 (2015).
18. N.A. Dodds, et al, *New insights gained on mechanisms of low-energy proton-induced SEUs by minimizing energy straggle*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **62**(6), 2822-2829 (2015).
19. Z. Wu, et al, *Recoil-ion-induced single event upsets in nanometer CMOS SRAM under low-energy proton radiation*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **64**(1), 654-664 (2016).
20. Y. Bing, et al, *Impact of energy straggle on proton-induced single event upset test in a 65-nm SRAM cell*, *Chinese Physics B*, **26**(8), 088501 (2017).
21. *Geant4.10.3, released 20 October (2017) (patch-03)* [online].available:// www.geant4.org.
22. B.D. Sierawski, et al, *CRÈME-MC: A physics-based single event effects tool*, In *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference*, 1258-1261. IEEE (2010).
23. *SRIM (2008)* [Online]. Available: <http://www.srim.org/20> (2008).